

高靈敏度掃描電容顯微術之 發展與應用

Development and Applications of High-Sensitivity Scanning Capacitance Microscopy

張茂男、黃智超、簡鳳佐

Mao-Nan Chang, Chih-Chao Huang, Feng-Tso Chien

掃描電容顯微術可偵測材料表面的微分電容訊號並將其成像，讓研究人員直接取得材料的電性分布資訊，除了被廣泛應用於載子濃度分布與電性接面的觀察，亦延伸出許多特殊的應用。然而隨著製程技術的快速發展，掃描電容顯微術亦已面臨幾項關鍵的挑戰，例如高空間解析度、高訊號靈敏度與定量化分析等要求，有愈來愈多的實驗證據指出，同時提高空間解析度與訊號靈敏度是有可能達成的。最近的研究結果顯示高靈敏度的掃描電容顯微術不但可以深入觀察載子濃度的微小變異，也可以用於深入研究摻雜的活化行為。本文將從四個不同的面向探討影響掃描電容顯微術訊號靈敏度的因素，包括系統架構、量測環境、試片製備以及導電探針，期望所提供的資訊能對產學界有所助益。

Scanning capacitance microscopy (SCM) can directly provide electrical properties of materials by detecting and imaging the differential capacitance signals on a material surface. In addition to the applications on the observations of carrier concentration distribution and electrical junctions, there are many extended applications for special topics. However, with the quick development of device processes SCM has also faced challenges such as high sensitivity, high spatial resolution and quantitative analysis. More and more experimental evidences suggested that it is possible to enhance both sensitivity and spatial resolution. Recently, experimental results indicated that high-sensitivity SCM can be applied to observe and to investigate not only the tiny variations of carrier concentration but also dopant activation behaviors in depth. In this article, we introduce the factors influencing the signal sensitivity of SCM, including system structure, experimental environment, specimen preparation and conductive probes. It is expected that the information provided in this article is helpful and useful for both academic and industrial fields.

一、前言

掃描電容顯微術 (scanning capacitance microscopy) 的肇始源自於觀察半導體材料中載子

濃度 (carrier concentration) 分布的需求，其發展至今已二十年以上的歷史。研究人員利用掃描電容顯微術偵測材料表面的微分電容 (differential capacitance, dC/dV) 訊號並將其成像，藉此直接

取得材料表面的電性分布資訊，除了已被廣泛應用於半導體載子濃度分布與電性接面 (electrical junctions) 的觀察⁽¹⁻⁵⁾，還延伸出許多特殊的應用，如微汙染引致缺陷的分析⁽⁶⁾、鐵電材料的特性研究⁽⁷⁾、差排缺陷的觀察⁽⁸⁾、介電層崩潰研究⁽⁹⁾ 以及摻雜活化⁽¹⁰⁾ 等。另一方面，研發人員的努力也使得掃描電容顯微鏡分析技術不斷進步，從訊雜比的改善到試片製備方式的精進，都使其測得的微分電容訊號更能夠真實反映出材料的電性資訊。由於掃描電容顯微術與其他的奈米電性分析技術都是以原子力顯微鏡 (atomic force microscope) 的架構為基礎，亦屬於掃描探針顯微術 (scanning probe microscopy) 的一環，因此，探針在掃描電容顯微術中，亦扮演著十分關鍵的角色。

就應用的觀點而言，空間解析度 (spatial resolution) 與訊號靈敏度 (sensitivity) 是所有掃描探針顯微術長久以來持續被關注的兩項基本課題，在掃描電容顯微術發展的過程中也不例外，導電探針在電性掃描探針顯微術中扮演著舉足輕重的角色，探針尖端與樣品表面的接觸面積對訊號強度有著直接而明顯的影響，然而增加接觸面積等於犧牲了空間解析度，因此如何在有限的微小接觸面積上大幅提升微分電容訊號強度，是能否擴展掃描電容顯微術應用範圍的關鍵之一。此外，定量分析也是另一項令人關切的問題，至今仍因許多複雜的技術因素而只能在少數個案中實現。在先前的專文中筆者曾介紹過掃描電容顯微術的基本概念與相關應用，也曾就微分電容訊號的干擾因素加以探討⁽¹¹⁻¹³⁾，然而隨著時間的演進與使用者的日益增加，有愈來愈多的研究需求顯示掃描電容顯微術仍存在著持續改善的空間。

本文將從系統架構、量測環境、導電探針以及試片製備等四個不同的面向探討影響掃描電容顯微術訊號靈敏度的因素，期望所提供的資訊能對掃描電容顯微術的發展與應用有所助益。

二、微分電容訊號

微分電容訊號是掃描電容顯微術呈現材料電性訊息的主要方式，因此，不論何種掃描電容顯微術

的分析應用，微分電容訊號的量測都可說是一項重要且必要的過程。微分電容訊號的相位與強度可用以辨識載子的極性與濃度，量測材料表面上的微分電容訊號分布並以影像方式呈現出來，可以讓研究人員直接觀察到載子濃度分布輪廓與電性接面的位置。為了能偵測到材料表面微小區域的微分電容訊號，最直接而有效的方法就是利用細小的導電針尖取代傳統電性量測的上電極 (top electrode)，再結合微分電容感測元件與原子力顯微鏡的掃描系統，即可在材料表面取得所需的電性資訊，這對微 / 奈米級半導體元件而言，是相當快速且便利的分析方法。

綜合上述，我們可以發現微分電容影像的取得，除了要有適當的掃描系統與導電探針，導電探針尖端與待測樣品表面的接觸也是影響微分電容訊號的重要環節，而這個環節也是最容易為人所忽略的，待測物的表面粗糙度與量測時的環境條件都會影響這個接觸面的狀況，進而對微分電容訊號產生影響。茲就各個影響微分電容訊號的環節加以說明討論如下。

1. 系統架構

掃描電容顯微術以原子力顯微鏡為其基礎架構⁽¹⁴⁾，為能取得電性訊息，其操作模式為接觸式掃描，在接觸式的操作模式下，原子力顯微鏡可以利用光束偏折的機制感測樣品表面形貌的變化，因此，掃描電容顯微術可以同步取得材料表面形貌與電性的訊息⁽¹⁵⁾。

目前原子力顯微鏡普遍使用波長介於紅光範圍的雷射光作為光束偏折感測機制的光源，然而對於許多半導體材料而言，此一範圍的光源所對應的能量值仍大於其能隙值，這意味著此一典型的掃描電容顯微術系統架構，有可能因原子力顯微鏡的光束偏折感測機制，導致材料表面產生明顯的光學吸收現象⁽¹⁶⁾，進而在分析區域產生額外的載子濃度，此亦稱為載子注入效應，其負面影響是降低掃描電容顯微鏡區別高載子濃度區域與低載子濃度區域的能力。換句話說，因系統架構之故，掃描電容顯微術可能無法真實反映出材料中的載子濃度分布⁽¹⁷⁾。除此之外，研究結果也顯示，在電性接面的觀察與分

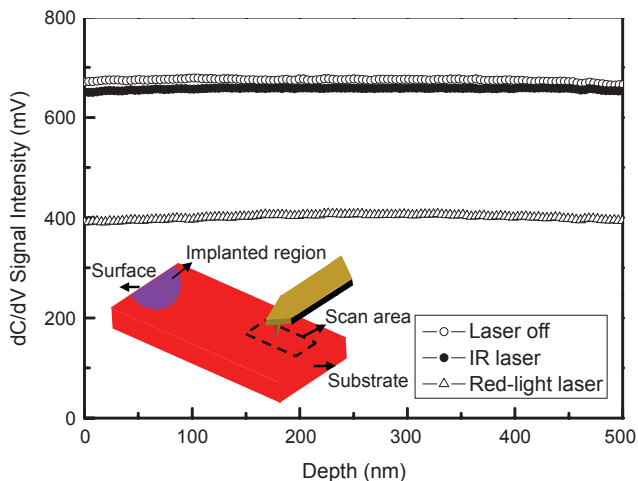


圖 1. 以同步掃描與兩階段掃描模式量測矽基板側表面的微分電容訊號分布，Laser off 表示系統在擷取電性訊號時，雷射光源是關閉的狀態；IR laser 表示，系統在擷取電性訊號時，紅外光雷射光源是開啟的狀態；Red-light laser 表示，系統在擷取電性訊號時，紅光雷射光源是開啟的狀態。

析上，光學吸收現象也會在界面區引發光電壓效應，導致所觀察到的界面寬度較實際寬度更窄⁽¹⁸⁾，由此可知，光學干擾將導致掃描電容顯微術無法靈敏地反應出真實的載子濃度分布狀況。

要解決上述問題，從系統架構的觀點而言，最直接的方法就是使用更低能量的雷射光源作為光束偏折感測機制，亦即使用波長比紅光波長更長的雷射光源（即紅外光雷射），另一個選擇就是犧牲同步掃描的優點，以兩階段掃描 (two-pass) 的方式來避免光學干擾，這種方式與磁力顯微術 (magnetic force microscopy) 的操作概念極為類似。先以接觸式掃描取得表面形貌的軌跡，再依據系統所記憶的

軌跡進行電性掃描分析，如此反覆進行掃描並將訊號成像，所以在電性訊號的偵測階段，光束偏折感測機制並不需要持續運作，因此可以有效避免電性分析時的光學干擾。

若分別以同步掃描與兩階段掃描模式量測矽基板側表面 (edge-surface) 的微分電容訊號分布，如圖 1 所示，可以發現以紅外光雷射作為表面形貌感測機制的同步掃描結果與兩階段掃描的結果十分接近，而以紅光雷射作為表面形貌感測機制的同步掃描結果，與前面兩組數據的差異則十分明顯，此一結果證實改變感測表面形貌的系統架構，可以有效改善微分電容訊號的光學干擾問題。

由於紅外光雷射的使用已可大幅抑制樣品表面產生載子注入效應機會，所以其結果與兩階段掃描的結果十分接近；就電性界面而言，比較不同掃描模式所測得的微分電容影像，如圖 2 所示，更可以看出採用兩階段掃描的好處，圖中的綠色帶狀區域為電性界面位置，光學干擾引起的光電壓效應對其寬度的影響十分明顯。就消除微分電容訊號的光學干擾而言，目前的實驗證據顯示兩階段的掃描模式較為理想。

2. 量測環境

掃描電容顯微術的優點之一就是具有可在大氣環境下操作的便利性，然而在一般大氣環境下操作，就必須面對環境溼度的所帶來的影響。一般而言，表面形貌的偵測較不易受環境相對溼度影響，但對電性分析而言，相對溼度高的環境很容易在探針與試片表面形成一層水膜，如圖 3(b) 所示，當施加調制電壓 (modulation bias) 量測微分電容圖譜 (scanning capacitance spectroscopy) 時，會產生明顯的遲滯 (hysteresis) 現象⁽¹⁹⁾。圖 4(a) 與圖 4(b) 分別

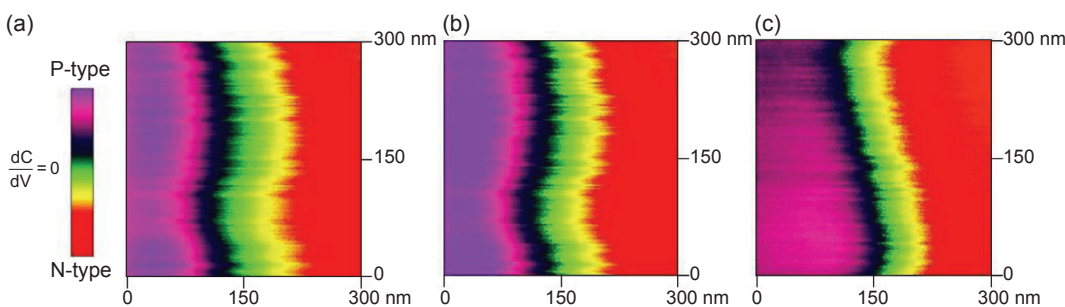


圖 2. (a) 兩階段掃描與 (b) 紅外光雷射同步掃描、(c) 紅光雷射同步掃描所測得的電性界面影像。

為在低相對濕度與高相對濕度環境中所測得的微分電容圖譜，此一結果顯示，隨著相對濕度的變化，微分電容圖譜亦隨之變化，換言之，在一個選定的偏壓點上，其微分電容訊號的大小與相位都可能因環境相對濕度的影響而改變。此外，環境濕度也可能導致等效接觸面積增大而降低了微分電容影像的空間解析度。簡而言之，量測環境的相對濕度除了導致微分電容訊號的不穩定，也對電性影像的解析度有負面的影響，對掃描電容顯微術的再現性來說，確實是一項不小的困擾。因此，如能將其掃描單元置入一個真空腔體中，使探針與試片表面的水膜影響大幅下降，如圖 3(a) 所示，將有機會解決相對溼度所造成不穩定現象。然而從儀器設備使用的實務面來看，真空腔體或可解決溼度所造成的問題，但也無可避免的增加了系統的維護成本。

3. 導電探針

對所有的掃描探針顯微鏡系統而言，探針都扮演著影響量測結果的關鍵角色，對於電性掃描探針顯微術而言，探針的影響更是顯著。一般而言，探針主要包括懸臂 (cantilever) 與針尖 (tip) 兩部分，先前的研究結果已指出前翼式的懸臂結構可有效抑制系統架構的光學干擾⁽²⁰⁾，相關的資訊細節已在先前的專文中介紹過，在此不再贅述。圖 5 顯示不同懸臂幾何規格的導電探針，在抑制光擾效應上的表現差異，其中 I-type 為一般市售導電探針；T1 探針的前翼式懸臂前端寬度約為 I-type 的 4 倍；T2 探針的前翼式懸臂前端約與 T1 探針相同，但後端寬度約為 I-type 的 3 倍；T3 探針的前翼式懸臂與 T2 相同，但探針尖位置明顯內縮。為突顯光擾的

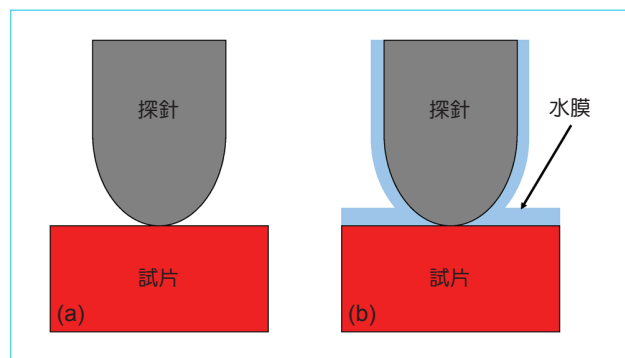


圖 3. 在 (a) 高相對濕度環境下與 (b) 真空環境下之探針與試片表面接觸示意圖。

影響，實驗樣品使用低摻雜濃度的矽基板。圖中的微分電容訊號差變 (ΔS) 來自於比較使用紅外光雷射進行同步掃描與採用兩階段掃描的微分電容訊號縱深分布影像之截線分析，由圖中的實驗結果可以發現懸臂在針尖下方所形成的有效暗區愈大，微分電容訊號也愈接近兩階段掃描所得到的結果 (即 ΔS 值愈小)，這意味著改變懸臂結構確實有助於偵測到真實的微分電容訊號。

由於所有的調制電壓與電性訊息都是透過極微小的探針尖端進行傳遞，探針的導電性對於微分電容訊號的激發與接收都有直接的影響。大多數的導電探針都是以矽探針為核心，再鍍上一層導電薄膜而形成，此類探針常因金屬鍍膜品質的問題，導致量測參數設定上與數據分析上的困擾。通常要使用較大的調制偏壓才能有較明顯的微分電容訊號，而由於場效 (field effect) 因素，調制偏壓愈大，微分電容影像的解析度就愈差。圖 6 顯示在兩階段掃描與定電壓操作模式下，使用不同的導電探針在矽基

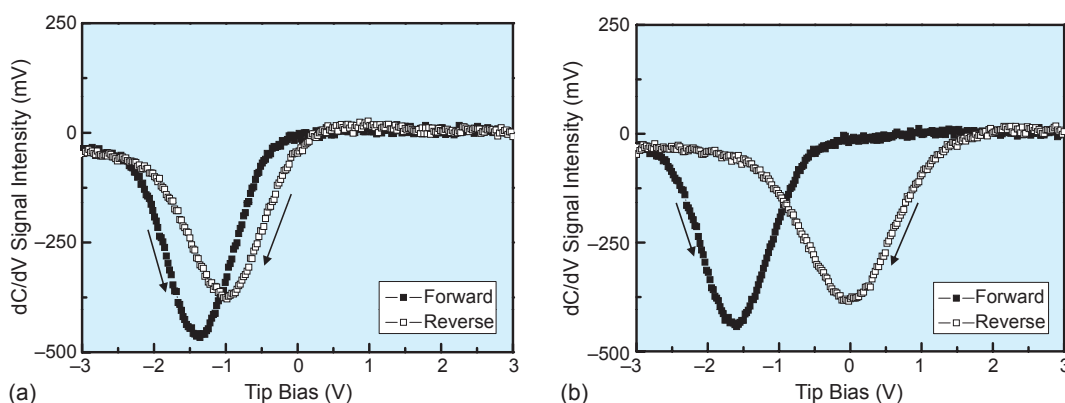


圖 4. 在 (a) 低相對濕度與 (b) 高相對濕度環境中所測得的微分電容圖譜。

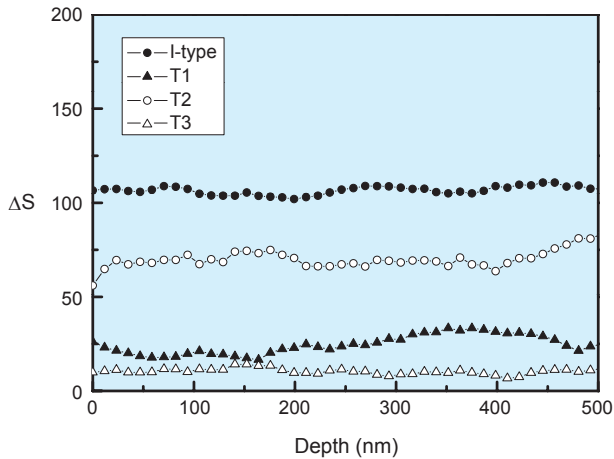


圖 5. 不同懸臂幾何規格的導電探針在矽基材上所測得的微分電容訊號差變 (ΔS) 分布圖，在試片掃描區上所形成的有效暗區大小分別是 $T3 > T1 > T2 > I\text{-type}$ 。

板上所取得的微分電容訊號強度分布，由圖中可明顯看出當調制電壓降到 0.2 伏特時，純金屬的導電探針仍能維持相當良好的訊號強度，其他採用金屬鍍膜方式製作的導電探針，由於導電性不佳，當調制電壓降到 0.5 伏特，其訊號強度便已經明顯下降，因此，探針的導電性對量測結果的影響已是顯而易見。

4. 試片製備

對掃描電容顯微術而言，試片製備對微分電容

訊號的影響與重要性是最早被研究人員注意到的項目之一，過去的技术發展著重於如何針對特定的極小區域，製作出符合量測要求的掃描電容顯微鏡試片，而現在我們都已經知道試片製備的關鍵就在於提供良好的試片電極與試片表面。表面平坦化是一項重要的過程，針對不同的待測樣品，都要有適當的方法將其表面平坦化，最常使用的方式就是化學機械研磨拋光 (CMP)。表面平坦度不佳很容易導致微分電容圖譜上出現平帶電壓位移 (flatband voltage shift) 的現象。

圖 7 為平帶電壓位移與試片表面平坦度 (R_a) 的關係， R_a 值的定義為

$$R_a = \frac{\left(\sum_i^N |h_i - h_a| \right)}{N}$$

其中， h_a 為 N 個量測點的高度平均值， h_i 為個別量測單點高度。由圖中的結果已可清楚看出表面平坦度對微分電容圖譜的影響，平帶電壓位移愈大表示在重複掃描時所產生的訊號偏差也愈大，這也意味著表面平坦度不佳將導致量測再現性的問題，通常當表面平均粗糙度在 0.2 nm 以下時，微分電容訊號值比較不會因重複掃描而產生太大的變化。當然，先前討論的環境相對溼度也會與表面平坦度合併影響微分電容訊號的偵測，這是實際進行量測分析時所應注意的。

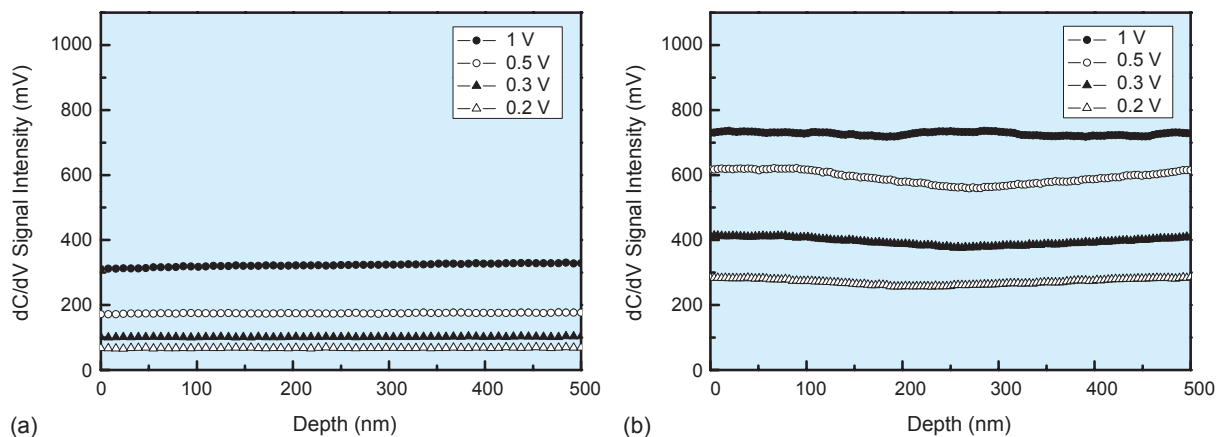


圖 6. 使用 (a) 金屬鍍膜與 (b) 純金屬的導電探針在矽基板上所取得的微分電容訊號強度分布，後者在調制電壓很小時仍可測得強度很好的微分電容訊號，圖 (b) 中的純金屬導電探針意指懸臂與探針尖皆為純金屬材質的探針，其探針形貌則與圖 (a) 中的導電探針相似。

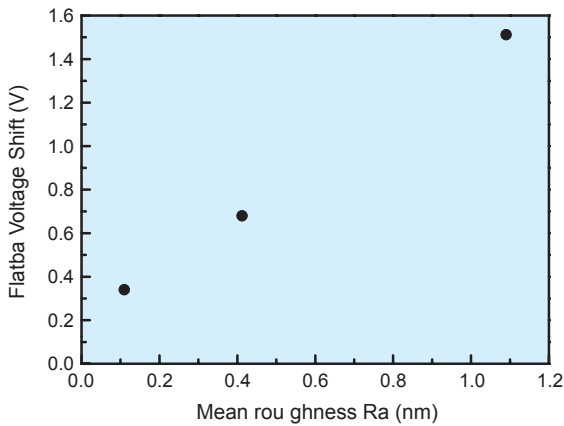


圖 7. 由微分電容圖譜所得到的平帶電壓位移與試片表面平坦度的關係。

三、應用實例

根據上述討論，我們可將相關經驗應用於矽鍺基材的量測分析上，由於矽鍺基材的能隙值會隨著鍺成分比例的增加而減小，因此對於鍺成分比例較高的矽鍺基材而言，其微分電容訊號值更容易受到光學干擾的影響，因此採用兩階段掃描模式進行微分電容訊號的偵測是比較適當的。但如前所述，此方式將無法兼顧同步掃描的優點，如果分析區域面積夠大或樣品表面條件良好，應不至於產生定位分析上困擾。

圖 8 為採用 T1 探針進行掃描的結果。圖 8(a) 顯示矽鍺基材中半個佈植區的微分電容影像，由於兩階段掃描模式對消除光學干擾的效果最為良好，因此可適用於分析高鍺成分比例的矽鍺基材電性分布。如果要採用同步掃描的方式分析矽鍺基材中的電性介面，根據上述討論，以 IR 雷射光的掃描系統與 T1 導電探針搭配，對圖 8(a) 的試片進行分析，也可以獲得十分良好的量測結果，如圖 8(b) 所示。就佈植區的微分電容影像而言，圖 8(a) 與圖 8(b) 的差異並不大，但若若深入了解所使用的前翼式導電探是否適用於矽鍺基材上，可以利用微分電容圖譜的訊號差變 (ΔS) 分布來判斷。

圖 9 為不同懸臂幾何規格的導電探針在微分電容訊號差變上的影響，由於操作批次的差異，圖 9 與圖 5 相較之下，數值普遍略低一些。由圖 9 的結果可知懸臂代號為 T3 的導電探針在同步掃描模式

下所測得的微分電容訊號，與採用兩階段掃描模式所取得的微分電容訊號最為接近，這表示此類導電探針較適合於以同步掃描模式分析矽鍺基材中的電性介面與載子濃度分布。

四、結論

雖然工欲善其事，必先利其器，然而對掃描探針顯微術的量測分析工作而言，只有利器是絕對不夠的，耗材、環境、方法也都是影響量測分析結果的重要因素。在經過多年的發展之後，掃描電容顯微術雖然已被應用於產學界，但其技術細節的改善空間也一直存在著。從使用者的觀點而言，試片製備是首要工作，沒有好的樣品表面就無法取得可靠的微分電容訊號，更遑論數據分析，樣品表面愈平坦，量測結果的可靠度愈佳。其次是量測環境的控制，除了防止電磁干擾與震動干擾之外，以往最容易被忽略的環境因素就是相對濕度，量測結果要有好的穩定性與再現性，低環境溼度是絕對必要的。

在探針方面，目前可以選擇的導電探針種類很多，但除了加強金屬鍍膜的品質之外，適當的懸臂

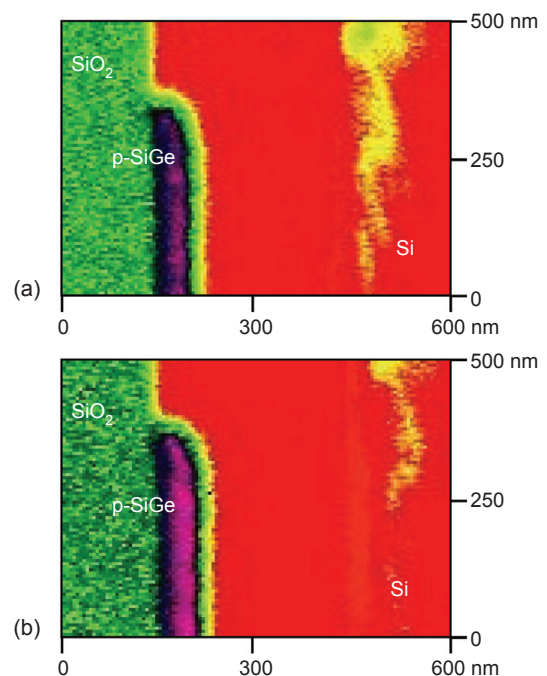


圖 8. 以 (a) 兩階段掃描模式與 (b) 同步掃描模式掃描矽鍺基材之佈植區所取得的電性介面影像。

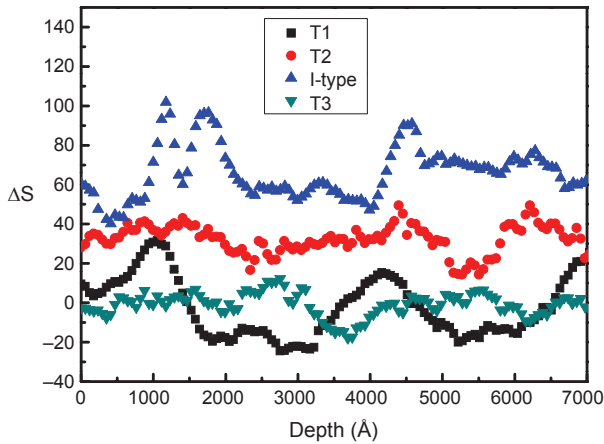


圖 9. 不同懸臂幾何規格的導電探針在矽鍺基材上所測得的微分電容訊號差變(ΔS) 分布圖。

結構亦可協助提升量測品質，再搭配兩階段掃描的操作模式，就可以大幅提高掃描電容顯微術對材料電性訊號的靈敏度。在空間解析度方面，除了縮小針尖尺寸，使用較小的調制電壓對於提高空間解析度也有正面幫助，如此將有助於利用掃描電容顯微術觀察更微小區域的載子濃度變化。靈感總來自於對事物的熟稔，本文從系統化的角度探討影響掃描電容顯微術靈敏度的因素，期望所提供的經驗與資訊能讓相關使用者更了解這一項分析技術的特性，以使掃描電容顯微術在研發工作中發揮更大的助益。

參考文獻

1. V. V. Zavyalov, J. S. McMurray, S. D. Stiring, C. C. Williams, and H. Smith, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **18**, 549 (2000).
2. V. V. Zavyalov, J. S. McMurray, and C. C. Williams, *J. Appl. Phys.*, **85**, 7774 (1999).
3. M. L. O'Malley, G. L. Timp, W. Timp, S. V. Moccio, J. P. Garno, and R. N. Kleiman, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3672 (1999).
4. Y. Huang, C. C. Williams, and J. Slinkman, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 344 (1995).
5. J. J. Kopanski, J. F. Marchiando, D. W. Berning, R. Alvis, and H. E. Smith, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **16**, 339 (1998).
6. M. N. Chang, C. Y. Chen, F. M. Pan, T. Y. Chang, and T. F. Lei, *Electrochem. Solid-State Lett.*, **5**, G69 (2002).
7. C. C. Leu, C. Y. Chen, C. H. Chien, M. N. Chang, F. Y. Hsu, and C. T. Hu, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 3493 (2003).
8. P. J. Hansen, Y. E. Strausser, A. N. Erickson, E. J. Tarsa, P. Kozodoy, E. G. Brazel, J. P. Ibbetson, U. Mishra, V. Narayanamurti, S. P. DenBaars, and J. S. Speck, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2247 (1998).
9. S. D. Wang, M. N. Chang, C. Y. Chen, and T. F. Lei, *Electrochemical and Solid-State Letters*, **8**, G233 (2005).
10. E. Bruno, S. Mirabella, G. Impellizzeri, F. Priolo, F. Giannazzo, V. Raineri, and E. Napolitani, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 133110 (2005).
11. 張茂男, 陳志遠, 潘扶民, 科儀新知, **22** (5), 67 (2003).
12. 張茂男, 陳志遠, 張子云, 潘扶民, 半導體科技, No. 24, 72 (2002).
13. 張茂男, 萬文武, 陳志遠, 賴建宏, 梁正宏, 潘扶民, 奈米通訊, **10** (2), 17 (2003).
14. 伍秀菁, 汪若文編, 奈米檢測技術, p.448, 新竹: 國家實驗研究院儀器科技研究中心 (2009).
15. R. C. Barrett and C. F. Quate, *J. Appl. Phys.*, **70**, 2725 (1991).
16. G. H. Buh and J. J. Kopanski, *Appl. Phys. Lett.*, **83** (12), 2486 (2003).
17. G. H. Buh, J. J. Kopanski, J. F. Marchiando, A. G. Birdwell, and Y. Kuk, *J. Appl. Phys.*, **94**, 2680 (2003).
18. M. N. Chang, C. Y. Chen, F. M. Pan, J. H. Lai, W. W. Wan, and J. H. Liang, *Appl. Phys. Lett.*, **82** (22), 3955 (2003).
19. J. Isenbart, A. Born, and R. Wiesendanger, *Appl. Phys. A*, **72**, S243 (2001).
20. M. N. Chang, C. Y. Chen, W. J. Huang, and T. C. Cheng, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 023102 (2005).



張茂男先生為國立中央大學電機博士，現任國立中興大學物理系副教授。

Mao-Nan Chang received his Ph.D. in electrical engineering from National Central University. He is currently an associate professor in the Department of Physics at National Chung Hsing University.



黃智超為逢甲大學電子工程碩士，現任逢甲大學電子所研究助理。

Chih-Chao Huang received his M.S. in electronic engineering from Feng Chia University. He is currently a research assistant in the Department of Electronic Engineering at Feng Chia University.



簡鳳佐為國立中央大學電機博士，現任逢甲大學電子所副教授。

Feng-Tso Chien received his Ph.D. in electrical engineering from National Central University. He is currently an associate professor in the Department of Electronic Engineering at Feng Chia University.